

**AUTOMATIC EXTRACTION SYSTEM OF MORPHOLOGICAL
PARAMETERS OF PLANTAR FOOTPRINT BY COMPUTER VISION
TECHNIQUES OVER AN EMBEDDED SYSTEM****SISTEMA DE EXTRACCIÓN AUTOMÁTICA DE PARÁMETROS
MORFOLÓGICOS DE LA HUELLA PLANTAR MEDIANTE TÉCNICAS DE
VISIÓN POR COMPUTADOR EN UN SISTEMA EMBEBIDO**

Ing. Carlos Ferrin^{*,}, Ing. Ximena Magdalena^{*}, PhD. Humberto Loaiza^{*}
Est. Steven López^{**}, Est. Sebastian Henao^{**}**

*** Universidad del Valle – ** Institución Universitaria Antonio José Camacho.**

*** Grupo de Percepción y Sistemas Inteligentes - ** Grupo de Control y Automatización.
Cali, Valle del Cauca, Colombia, Tel.: (+572) - 321 2100.**

E-mail: {carlos.ferrin, ximena.magdalena, humberto.loaiza}@correounivalle.edu.co

Abstract: In this paper a methodology for computer vision is proposed in an embedded system that enables the automatic acquisition of morphological parameters from podoscopies. The system is shown to be robust and low cost, and obtaining the parameters is performed in considerably lesser time than conventional approach. The system will accelerate research in podiatric medical field.

Keywords: Podoscopy, morphological parameters, computer vision, embedded system.

Resumen: En este documento se propone una metodología de visión por computador en un sistema embebido que permite la obtención automática de los parámetros morfológicos a partir de podoscopías. El sistema muestra ser robusto y de bajo costo; la obtención de los parámetros que se realiza es considerablemente menor a los enfoques convencionales. El sistema permitirá acelerar las investigaciones en el campo médico podológico.

Palabras clave: Podoscopia, parámetros morfológicos, visión, sistema embebido.

1. INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones del análisis de la huella plantar incluyen los procesos de evaluación de la condición podológica en pacientes diabéticos, la caracterización antropométrica de deportistas de alto rendimiento y el estudio de la evolución de la marcha en pacientes con problemas del sistema locomotor.

El análisis cuantitativo de la huella plantar a partir de imágenes es un proceso en esencia de tipo geométrico (Dancloff *et al.*, 1989; Diéguez *et al.*, 2011; Fuente, 2003).

El método consiste en encontrar puntos características de la imagen y después realizar trazado de líneas que une estos puntos. Algunos parámetros morfológicos de la huella son la medida directa de la longitud de las líneas, el ángulo formado entre ellas, o la proporción entre algunas de estas medidas, etc.

En la figura 1 se puede ver una podoscopia de la huella plantar. Con ayuda de este tipo de imágenes la zona de contacto queda realizada, en este caso particular, mediante el color verde. Es importante anotar que los procedimientos trabajan precisamente sobre la zona de contacto y no sobre la imagen de la bóveda plantar.



Fig. 1. Podoscopía de luz verde.

Un estudio previo reportado en (Ferrin *et al.*, 2013) plantea la implementación de una metodología semiautomática para análisis de la huella plantar. Los resultados obtenidos muestran una aceleración considerable en el proceso de análisis de la huella. Sin embargo, dentro del esquema metodológico propuesto, la etapa de obtención de puntos (ver figura 2) es llevado a cabo por el usuario mediante selección de ROI (Regiones de Interés) cerca a cada uno de los puntos. Además, se hace también necesario fijar un umbral en la etapa de segmentación y no se evalúa el efecto de su elección en los parámetros.



Fig. 2. Diagrama de puntos para obtener los parámetros morfológicos. Se tiene un total de siete.

Entre los parámetros más utilizados se tiene el ángulo de Clarke, el índice de Hernández-Corvo, el de Staheli, etc. Algunos de estos se pueden correlacionar en algunas circunstancias (Dancloff *et al.*, 1989; Fuente, 2003). Una exposición completa de los parámetros y su interpretación se encuentra en (B & Magdalena, 2013).

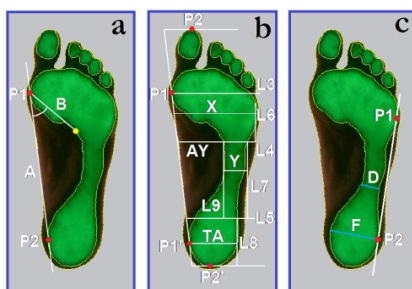


Fig. 3. Puntos de interés para obtención de: (a) ángulo de Clarke, (b) índice de Hernández-Corvo e índice de Staheli.

A continuación se describe el diseño e implementación un sistema de análisis de la huella plantar mediante técnicas de visión por computador que soluciona las limitaciones de la metodología propuesta en (Ferrin *et al.*, 2013), mencionadas arriba, y se estudia el efecto de la elección de umbral sobre los parámetros obtenidos para una misma imagen. Las técnicas aquí desarrolladas son implementadas en un sistema embebido, minimizando el presupuesto en futuras implementaciones industriales.

2. METODOLOGÍA

En la figura 4 se describe el sistema de adquisición y a su vez se indica los diferentes bloques funcionales para el diseño de un sistema de análisis de huella plantar utilizando un podoscopio y un sistema embebido como unidad central de control y procesamiento.

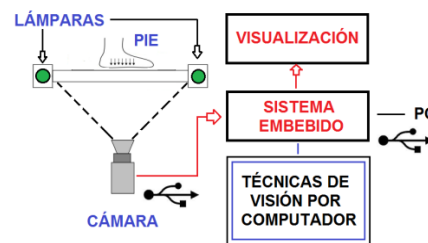


Fig. 4. Sistema de análisis de huella utilizando sistema embebido

En este diagrama se reconoce cuatro elementos importantes, a saber, el sistema de adquisición, encargado de generar la información deseada; las técnicas de visión por computador, las cuales procesan y generan los parámetros morfológicos, estas se ejecutarán en el sistema embebido; la etapa de visualización, a través de la cual el usuario podrá controlar el funcionamiento del sistema en general, además de permitirle la inmediata visualización de resultados; y finalmente el sistema embebido, que es el encargado recibir, procesar y entregar la información desde y hacia los otros elementos del sistema en general.

2.1 Sistema de adquisición

El sistema de adquisición consta de una lámina de vidrio de 60x50 cm con 1 cm de grosor; en los costados se ubican lámparas cilíndricas de color verde. Se utilizan este tipo de lámparas porque el vidrio presenta un alto valor de transmitancia en la longitud de onda del verde (AGC, 2013) (Hecht, 2001), favoreciendo así la imagen obtenida.

Cada vez que se hace contacto con la lámina, los rayos de luz que viajan dentro de la lámina de vidrio son dispersados hacia fuera de la misma; este fenómeno es conocido como reflexión total interna frustrada (Hecht, 2001). La imagen es capturada con una cámara RGB de 640x480 y 8 bits de profundidad por cada canal, la cual está ubicada debajo de la lámina de vidrio. En esta geometría, el pie derecho aparece en la zona izquierda de la imagen y viceversa, ver figura 1.

2.2 Técnicas de visión por computador

En la figura 5 se presenta el diagrama de bloque de las técnicas de visión por computador aplicadas a la imagen de la huella plantar. El bloque de **Obtención de Puntos** (resaltado en rojo), hace uso de $IBorde(x, y)$ y de la detección de regiones de interés ROI que contengan al punto extremo, y así entrega los siete puntos ($P_i = (x_i, y_i) \mid i=1, 2, \dots, 7$). A diferencia de la propuesta en (Ferrin *et al.*, 2013) la intervención de un usuario no es necesario ahora.

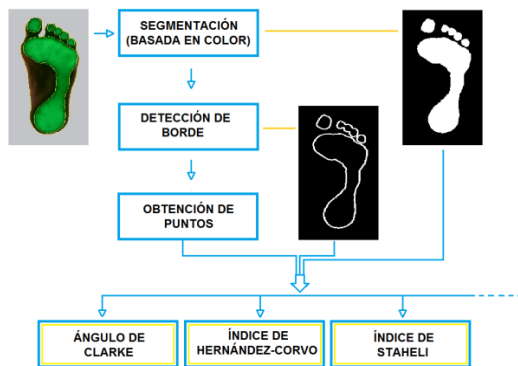


Fig. 5. Diagrama de bloques en la metodología de obtención de parámetro morfológicos a partir de la podoscopía.

Finalmente, los parámetros morfológicos pueden ser vistos como funciones explícitas e implícitas con variables de entrada: los siete puntos, la imagen segmentada y la imagen de borde; es de anotar que estas funciones son de valor real en todos los casos.

2.2.1 Segmentación y detección de bordes

Para estas etapas se utilizan las mismas técnicas desarrolladas en (Ferrin *et al.*, 2013) a saber, segmentación mediante la umbralización del mapa verde (ver figura 6) de la imagen y el detector óptimo de bordes Canny. La elección de estas técnicas se debe principalmente a que han mostrado alta robustez a condiciones de presencia de fuentes parásitas.

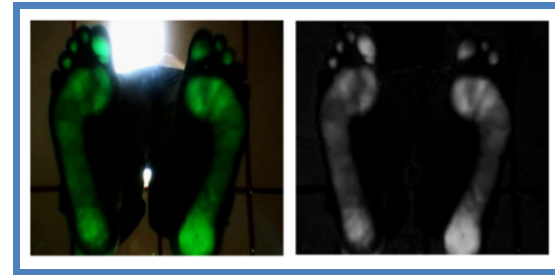


Fig. 6. Imagen de entrada (*Iz.*) y su mapa verde (*De.*).

2.2.3 Obtención de puntos

Para la obtención de puntos extremos, se deben detectar ROI rectangular que contenga la porción de borde, de la cual se tiene certeza se encuentra dicho punto. Pero antes, deben detectarse las ROI que contienen las huellas plantares segmentadas.

Utilizando una integral proyectiva horizontal (García, 2007) de la imagen segmentada, es posible detectar puntos que delimitan las regiones correspondientes a cada pie, ver figura 7.

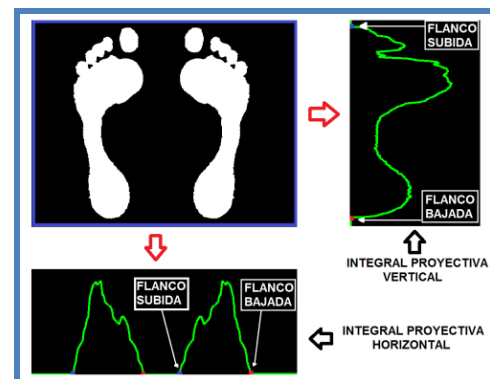


Fig. 7. Imagen segmentada de las huellas plantares y su integral proyectiva.

Luego, utilizando un algoritmo de detección de flanco de subida se obtiene los puntos más extremos hacia la izquierda de las regiones de los huellas, e igualmente mediante un algoritmo de detección de flancos de bajada se detectan los puntos más extremos hacia la derecha. Para esto se recorre el vector que almacena la integral proyectiva con un kernel de 1x3 que analizará la transición desde cero hacia un valor diferente de cero para los flancos de subida y de un valor diferente de cero hacia el cero para los flancos de bajada, ver figura 7.

Un procedimiento similar, utilizando una integral proyectiva vertical, permite obtener los puntos que delimitan a lo largo del eje Y los dos pie. La

diferencia es que ahora los flancos de subida y de bajada se detectan una sola vez, ver figura 7. Con estos puntos se crean ROI's que contienen a cada huella segmentada.

Utilizando un algoritmo de detección de regiones rectangulares orientadas de mínima área (Bradski & Kaehler, 2008; Gonzales & Woods, 1996) que contiene a un conjunto de pixeles es posible estimar la ubicación y orientación que tiene cada huella.

Haciendo uso de la información del centro del rectángulo y del ángulo de inclinación de su eje más largo, se aplica una transformación rígida (Bradski & Kaehler, 2008) a cada huella (en imágenes separadas) de tal forma que su centro ahora esté en el centro de la imagen y su eje más largo sea paralelo al eje Y de la misma imagen.

Para la localización de cada uno de los siete puntos deben definirse ROI de búsqueda. Para esto se utiliza ahora la información del rectángulo de mínima área que contiene a cada huella. Un rectángulo de estas características se define a partir de la coordenada de su esquina superior derecha, (x_R , y_R), de su ancho, W_R y de su altura, H_R .

A partir de esta información (para cada huella) se definen las 7 regiones de búsqueda tanto para el pie derecho como para el izquierdo, ver tablas 1 y 2 para el pie izquierdo y el derecho, respectivamente. Para este caso: **TE** indica el tipo de esquina (1 – Esquina superior derecha, 2 – Esquina superior izquierda, 3 – Esquina inferior derecha y 4 – Esquina inferior izquierda). Y **Eje** define el tipo de máximo a buscar (Ferrin, 2013).

Tabla 1. Definición de ROI para la búsqueda de los siete puntos Pie Izquierdo.

Punto	TE	x	y	w	h	Eje
P1	1	x_R	y_R	W_R	$0.25H_R$	X
P2	3	$x_R + W_R$	$y_R + 0.5H_R$	$0.5W_R$	$0.75H_R$	Y
P3	4	x_R	$y_R + 0.5H_R$	$0.5W_R$	$0.75H_R$	Y
P4	3	$x_R + W_R$	$y_R + 0.5H_R$	$0.5W_R$	$0.75H_R$	Y
P5	3	$x_R + W_R$	$y_R + H_R$	$0.25W_R$	$0.25H_R$	Y
P6	4	x_R	$y_R + H_R$	$0.25W_R$	$0.25H_R$	Y
P7	3	x_R	$y_R + H_R$	W_R	$0.25H_R$	X

Tabla 2. Definición de ROI para la búsqueda de los siete puntos Pie Derecho.

Punto	TE	x	y	w	h	Eje
P1	1	x_R	y_R	W_R	$0.25H_R$	X
P2	4	x_R	$y_R + 0.5H_R$	$0.5W_R$	$0.75H_R$	Y
P3	3	$x_R + W_R$	$y_R + 0.5H_R$	$0.5W_R$	$0.75H_R$	Y
P4	4	x_R	$y_R + 0.5H_R$	$0.5W_R$	$0.75H_R$	Y
P5	3	x_R	$y_R + H_R$	$0.25W_R$	$0.25H_R$	Y
P6	4	$x_R + W_R$	$y_R + H_R$	$0.25W_R$	$0.25H_R$	Y
P7	3	x_R	$y_R + H_R$	W_R	$0.25H_R$	X

El tamaño de las ROI's se obtuvo con base en la geometría del pie y aprovechando la altura y ancho del mismo para realizar esta propuesta. En trabajos futuros se realizarán nuevas propuestas teniendo en cuenta otros modelos. El tipo de esquina y el eje de referencia de estas ROI's definen un tipo arrastre en sentido diagonal en cualquiera de las 4 direcciones posibles, partir de aquí se utiliza el mismo procedimiento desarrollado en (B & Magdalena, 2013) para la obtención de los puntos extremos del contorno dentro de cada ROI.

2.3 Sistema Embebido

Debido a sus características, se usa el sistema *BeagleBone Black* (Project, 2013), cuyas características computacionales permiten la implementación de los algoritmos descritos arriba, ver figura 8.

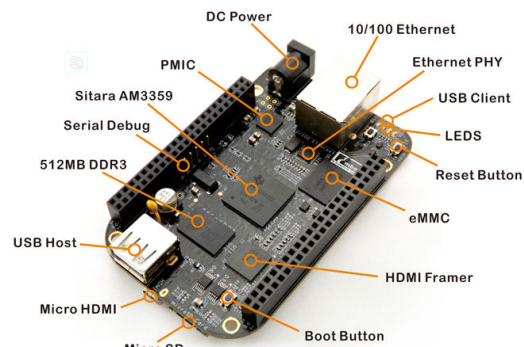


Fig. 8. BeagleBone Black.

Las técnicas de visión por computador son implementadas en este sistema haciendo uso de la biblioteca OpenCV2.2 para Linux Angstrom, debido a que esta posee una licencia tipo BSD, lo que permite utilizarla con fines comerciales y académicos.

2.4 Sistema de visualización

Dada la conectividad del sistema embebido es posible visualizar el entorno de escritorio utilizando una pantalla táctil, ver figura 9.

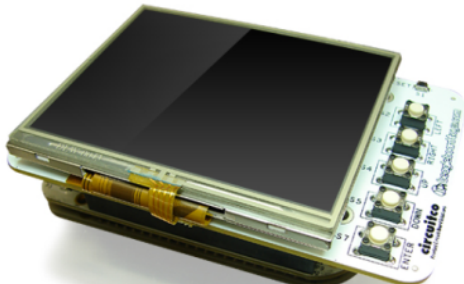


Fig. 9. Cape LCD 3 TFT touchscreen 3.5" (Project, 2013).

Esta pantalla posee una resolución de 320x240, y se conecta directamente sobre la BeagleBone Black, no necesitando hardware adicional para su correcto funcionamiento. A través de esta se visualizan los resultados y se controla la interfaz gráfica del sistema en general.

3. RESULTADOS

En la figura 10 se muestra el diseño final del sistema de adquisición y análisis de huella plantar mediante cámara USB y el sistema *BeagleBone Black*:

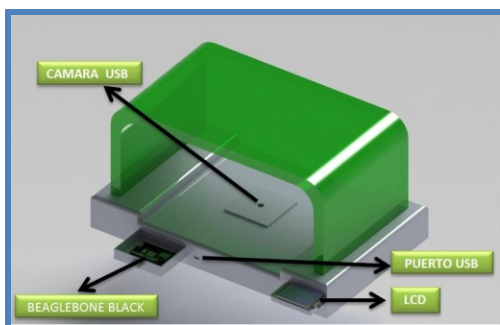


Fig. 10. Diseño final del sistema de análisis de huella plantar.

Las técnicas de visión por computador fueron implementadas en C++ y se desarrolló una interfaz gráfica de usuario utilizando la biblioteca Qt para Windows 7 de 32 Bit (A2) y Linux Ubuntu 12.04 (A3), ambos sobre una plataforma Intel Dual Core de 1.8GHz; y una aplicación tipo consola para Linux Angstrom sobre BeagleBone Black (A1), ver figura 11 y 12.

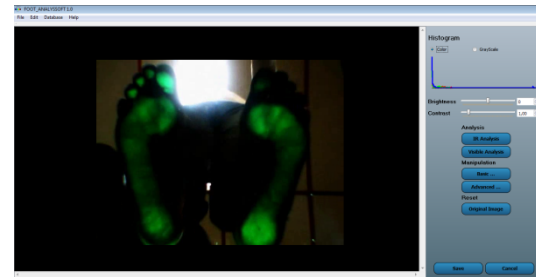


Fig. 11. Interfaz gráfica de usuario para Linux Ubuntu y Windows 7.

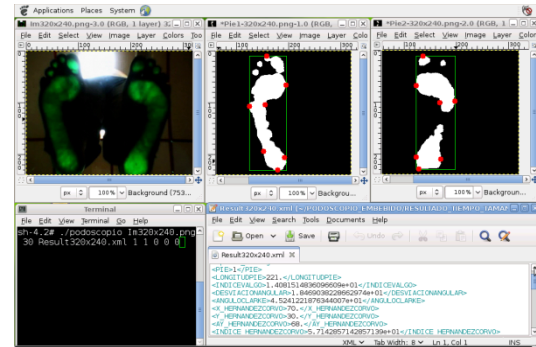


Fig. 12. Aplicación tipo consola sobre Linux Angstrom.

Se realizó una prueba de tiempo de procesamiento (con $U=30$), excluyendo la etapa de captura y visualización, de una misma imagen de la huella plantar a diferentes tamaño, a saber, 160x120, 320x240, 640x480 y 1280x960. Estas imágenes fueron procesadas en las arquitecturas computacionales A1, A2 y A3. En la tabla 3 se encuentran las medidas obtenidas para cada caso y en la figura 13 se visualizan los mismos.

Tabla 1. Tiempos de ejecución (en ms) para las arquitecturas estudiadas.

	A1	A2	A3
160x120	1372	281	187
320x240	6942	1966	13721
640x480	49924	16458	9557
1280x960	409059	135035	79286

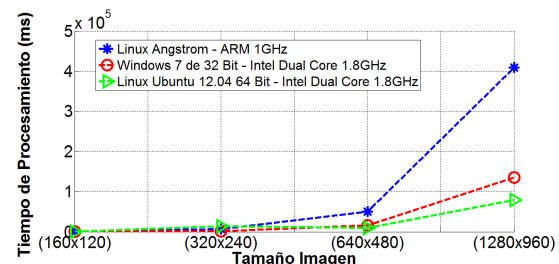


Fig. 13. Tiempos de ejecución para imágenes de diferente tamaño.

Se puede observar que el tiempo de procesamiento para todas las arquitecturas no supera los 50s hasta un tamaño máximo de 640x480 en la imagen. Claramente la arquitectura de ejecución más rápida es A3. Es importante añadir que en todos los casos los parámetros obtenidos fueron los mismos, a excepción de la imagen de tamaño 160x120.

Por último y dado que la elección del umbral determina la interpretación final de los resultados, se estudió el comportamiento de algunos parámetros morfológicos de la huella para valores de U desde 1 hasta 130 para una imagen sin problemas de fuentes parasitas en su fondo, ver figura 14.



Fig. 14. Imagen de prueba (640x480) para estudiar cambios de los parámetros morfológicos en función de U.

En las figuras 15 y 16 se muestran los resultados obtenidos para cuatro índices morfológicos y para dos parámetros angulares, respectivamente.

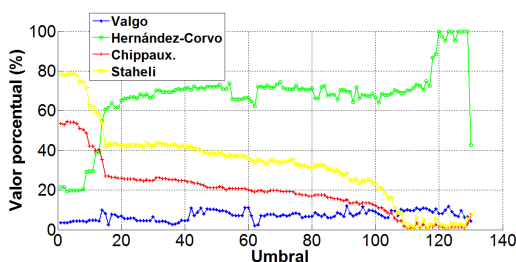


Fig. 15. Índices morfológicos en función de U.

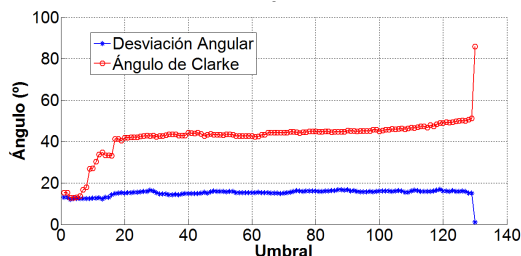


Fig. 16. Parámetros angulares de la huella en función de U.

En un rango de umbrales de 20 a 100 se obtuvo lo siguiente: la desviación angular varía entre 16.8° y 14.4°, el ángulo de Clarke entre 41.8° y 45.7°. Por su parte en los índices morfológicos presentan

mayores variaciones: índice de valgo entre 2.1% y 12.1%, índice de Hernández-Corvo entre 62.2% y 74.5%, índice de Chippaux de 12.2% a 20.2%, y por último, el índice de Staheli de 23.2% a 43.7%.

Si se utilizara el Ángulo de Clarke para determinar la condición podológica (para cualquier Umbral entre 20 y 100) la interpretación a partir del mismo sería la misma: Pie normal con una ligera tendencia a pie cavo. Con el índice de Hernández-Corvo se obtiene la misma interpretación, corroborando la correlación existente entre estos parámetros. Aun cuando la interpretación a partir del índice de Staheli es la misma para cualquier umbral, esta discrepa con el ángulo de Clarke y el índice de Hernández Corvo. Lo mismo ocurre con el índice de Chippaux y la desviación angular. Finalmente, la interpretación del índice de valgo sí depende del umbral, entonces se debe tener cuidado con la elección del mismo, evaluando la segmentación y los puntos detectados.

4. CONCLUSIONES

Se desarrolló una nueva metodología de extracción de parámetros morfológicos de la huella plantar asistida por computador. Las etapas claves de procesamiento y obtención de parámetros se realizan de forma automática. Las técnicas de procesamiento de imágenes demuestran ser robustas, flexibles a cambios de iluminación y extensible a otro tipo de imágenes.

En general los parámetros morfológicos conservan su interpretación para valores umbrales en un rango de 20 a 100, algunos se correlacionan y otros no tanto. Se debe tener especial cuidado con el índice de Valgo cuya interpretación varía fuertemente en este rango. Los desempeños obtenidos en el sistema embebido son muy similares a los obtenidos en las otras arquitecturas estudiadas, hasta un tamaño máximo de 640x480 en la imagen de entrada, pudiendo así obtener tiempos de ejecución similares a los de un PC, pero a un menor costo.

RECONOCIMIENTOS

Al Ministerio de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (MINTIC), por el apoyo brindado a través del programa Talento Digital. Al Programa de Postgrados en Ingeniería Eléctrica y Electrónica (PPIEE), por su gestión administrativa para lograr que la investigación fuera exitosa.

REFERENCIAS

- AGC Glass Iberica. (2013). II. Todo sobre el Vidrio (1st ed., p. 152). Louvain-La-Neuve, Belgium: <http://www.yourglass.com/agc-glass-europe/es/es/home.html>. Retrieved from <http://www.yourglass.com/agc-glass-europe/es/es/home.html>
- Ferrin B., C. D.; Magdalena, X. y Loaiza C., C. (2013). Determinación semiautomática de parámetros morfológicos de la huella plantar mediante el procesamiento digital de imágenes. *Revista Sistemas & Telemática*, 11(2013), 9–26.
- Bradski, G., & Kaehler, A. (2008). *Learning OpenCV*. (M. Loukides, Ed.) (1st ed., p. 571). Sebastopol: O'Reilly Media, Inc.
- Dancloff, C., Forriol, F., & Pellico, L. G. (1989). Relación entre diferentes parámetros radiológicos del pie.pdf. *Revista Española de Cirugía Osteoarticular*, 151–158.
- Diéguez, S. L., Jesús, A., Sánchez, L., Luisa, M., Sánchez, Z., & Martínez-López, E. J. (2011). Análisis de los diferentes métodos de evaluación de la huella plantar. *Retos. Nuevas tendencias en Educación Física, Deporte y Recreación*, 19, 49–53. http://www.retos.org/numero_19/RETOS_19_49-53.pdf
- Fuente, J. L. M. de la. (2003). *Podología general y Biomecánica*. (S. A. Masson, Ed.) (1st ed., p. 313). Barcelona, España.
- García, G. (2007). *Procesamiento de Caras Humanas Mediante Integrales Proyectivas*. Universidad de Murcia.
- Gonzales, R., & Woods, R. (1996). *Tratamiento digital de imágenes*. (S. A. Editorial Díaz de Santos, Ed.) (p. 800).
- Hecht, E. (2001). *Óptica*. (Addison-Wesley, Ed.) (3rd ed., p. 722).
- Project, B. (2013). Beagleboard Organization. <http://beagleboard.org/>. Retrieved October 02, 2013, from <http://beagleboard.org/>